

УДК 621.373.826:772.99

ОПТИЧЕСКИЕ СИНТЕЗИРОВАННЫЕ АПЕРТУРЫ В ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ СИСТЕМАХ

В.П.Титарь*Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Украина, 61077, Харьков, пл. Свободы, 4*

Поступила в редакцию 20 мая 2011 г.

Проведен анализ современного состояния исследований по созданию объемного телевидения. Предложены новые методы формирования голограмм на фотоэлектронных устройствах. Приведена блок-схема голографической телевизионной системы, реализующая метод синтеза оптических голограмм. Показана возможность синтеза трехмерных голограмм объемных объектов на фотоэлектронных устройствах. Предложен метод и принципы построения цветных голографических систем.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: голографическое телевидение, синтезирование голограмм, линейные оптические антенны, ПЗС-матрицы, цветные голографические телевизионные системы.

Проведено аналіз сучасного стану досліджень щодо створення об'ємного телебачення. Запропоновано нові методи формування голограм на фотоелектронних пристроях. Наведено блок-схему голографічної телевізійної системи, яка реалізує метод синтезування оптичних голограм. Показано можливість синтезування тривимірних голограм об'ємних об'єктів на фотоелектронних пристроях. Запропоновано метод та принципи побудови кольорових голографічних систем.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: голографічне телебачення, синтезування голограм, лінійні оптичні антени, ПЗС-матриці, кольорові голографічні телевізійні системи.

The analysis of the modern state of investigations concerning the creation of holographic television has been carried out. The new methods of hologram formation on photo electronic devices are proposed. The scheme of the holographic television system realizing the method of synthesizing optical holograms is presented. The possibility of synthesizing three-dimensional holograms of volume objects on photo electron devices is shown. The method and principles of constructing colour holographic television system is proposed.

KEY WORDS: holographic television, synthesizing holograms, linear optical antennas, CCD-matrix, colour holographic television systems.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ведущие компании США, Европы, Японии, Китая и России интенсивно продвигают для внедрения на потребительский рынок объемное телевидение. Согласно официальным данным, США за последние 10 лет израсходовали на разработку голографического телевидения 10 млрд. долларов, Япония – 7 млрд. долларов. Несмотря на то, что в принятых государственных программах США, Японии, Китая и других стран планировалось к 2016 г. сделать голографические телевизионные системы рыночным продуктом, но на сегодняшний день ни в одной из этих стран голографическая ТВ система не создана, и пока нет предпосылок для решения этой задачи. Усилия всех ведущих стран направлены на создание стереоскопических ТВ систем, а не голографических систем. Но разрабатываемые стереоскопические ТВ системы оказываются сложными, дорогостоящими или неудобными из-за применения специальных очков и ограниченной зоной просмотра. Так, американская компания SportTV & Visit продемонстрировала систему 3D телевидения, в которой использовали 35 телевизионных камер высокого разрешения. Камеры одновременно передают много ракурсы изображения в студию. Кроме того, для большей надежности применяется инфракрасное сканирование. Информация, необходимая для построения трехмерного изображения, в режиме реального времени обрабатывалась с помощью 12 суперкомпьютеров.

Согласно данным японского информационного агентства NHK, в продажу первые стереоскопические телевизоры поступят в 2020 г. В этот проект японские производители планируют вложить еще более 4 млрд., кроме освоенных уже 7 млрд. долларов. Ведущие фирмы уже осознали, что к 2016 году освоить производство объемного телевидения не удастся, и планируют продемонстрировать действующие прототипы голографических ТВ систем в 2020-2022 гг.

Применение методов голографии открывает новые возможности построения голографической телевизионной системы (ГТС), которая обеспечивает получение на приемном конце такой системы рельефных, много ракурсных и помехоустойчивых цветных изображений протяженных сцен и трехмерных объектов. При этом, в связи с большой удельной плотностью голографической информации, необходимо регистрировать и передавать по каналам связи большое количество дискретных элементов голограмм, которые превышают реальные возможности существующих телевизионных устройств и стандартных каналов связи [1, 2].

При наблюдении движущихся объектов в реальном времени требуемая скорость обработки информации еще больше возрастает. Поэтому для наблюдения динамических объектов с помощью ГТС нужно либо увеличить скорость регистрации, передачи и обработки информации, либо сократить ее объем.

В первых экспериментальных работах, выполненных в 1960-х годах, обзор которых приведен в [3], согласование объема голографической информации с параметрами каналов связи производилось с помощью регистрации голограмм, не содержащих высоких пространственных частот. При этом увеличивались размеры предназначенных для передачи участков голограмм, голограммы передавались с двумя градациями яркости, а также при использовании каналов связи с большим, чем у телевизионного канала, числом элементов разложения (фототелеграфный канал). Однако указанные методы не позволяли передавать по каналам связи высококачественные голографические изображения.

Рассмотрим проблемы, возникающие при построении ГТС, проанализируем возможность для их решения, а также обсудим полученные при этом результаты.

МЕТОДЫ СИНТЕЗИРОВАНИЯ ГОЛОГРАММ

В лаборатории радио- и оптической голографии Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина разработанные принципы создания ГТС, основанные на применении различных методов синтеза голограмм, по аналогии с методами синтеза, применяемые в радиоголографии [4].

Один из методов синтеза голограмм в ГТС может быть реализован с помощью двух накрест расположенных линейных оптических антенн, состоящих из микрообъективов с подведенными к ним световодами, которые идут от излучающей и анализирующей аппаратуры. Одна из антенн при этом является излучающей, а другая – приемной. Применение такого метода обеспечивает возможность регистрации МN дискретных элементов голограммы при использовании всего лишь M+N излучающих и приемных элементов приемо-передающей апертуры ГТС. Для обеспечения синтеза строки голограммы по координате, параллельной излучающей антенне, используется линейное сканирование фазового центра излучающей антенны. Прием отраженных от объекта сигналов производится элементами приемной антенны одновременно. Разрешающая способность ГТС определяется апертурой синтезированной голограммы [5]. Сокращение избыточности передаваемой информации в ГТС достигается путем расположения микрообъективов на линейных оптических антеннах в точках, координаты которых соответствуют одной из реализаций равновероятного распределения, в результате чего элементы синтезированной голограммы располагаются в узлах неэквидистантной решетки со "случайными" периодами.

Разработаны основные принципы построения макета ГТС, требования к его основным узлам и системе цифровой регистрации и обработки телевизионной голографической информации, а также создан действующий макет ГТС.

В работе Э. Лейта, Ю. Упатниекса и др., выполненной в 1965 г. [6], приведена структурная схема ГТС, предназначенная для передачи крупных студийных сцен. Передаваемая сцена освещается либо одним, либо несколькими взаимно когерентными лазерными излучениями. Отраженное объектами сцены излучение вместе с опорным излучением попадает на анализирующее устройство голографической ТВ-камеры, которая преобразует интерференционную картину в последовательность электрических сигналов. Эти сигналы затем передаются по каналу связи. На экране приемного устройства из электрических сигналов формируется голограмма, которая при освещении ее лучом лазера восстанавливает передаваемый сюжет.

Авторами работы [6] были впервые сформулированы требования к ГТС. При этом оценка полосы частот, необходимой для передачи сцены с объемом $6 \times 6 \times 9 \text{ м}^3$ голограммой с размерами $10 \times 10 \text{ см}^2$ при частоте кадров 30 Гц, дала величину $1,5 \times 10^{11}$ Гц, что на пять порядков больше величины стандартной, равной $6,5 \times 10^5$ Гц.

В этой же работе обсуждались принципы построения ГТС, работающей в реальном времени. По мнению авторов, высокого качества передачи объемных изображений можно достичь при решении задач улучшения разрешения телекамеры, разработки систем быстрой передачи большого объема информации (типа сверхширокополосной системы связи на лазерном пучке), разработки приемных устройств, работающих в реальном времени.

В настоящее время наблюдается существенный прогресс в решении этих проблем: созданы высокоразрешающие ПЗС-камеры для ТВЧ, причем качество вновь создаваемых камер быстро улучшается; созданы сверхширокополосные ВОЛС, которые в принципе могут решить проблему передачи информации в ГТС; в стадии практической разработки находится трехмерный голографический дисплей, работающий в реальном времени.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГТС

Основные принципы ТВ-голографии и информационные свойства ТВ-голограмм наиболее полно изложены в работах [1, 7], где отмечается, что высокая удельная плотность голографической информации приводит к затруднениям при передаче ее по каналам связи.

С учетом особенностей дискретных пространственных спектров объектов голографирования в [5] рассмотрена проблема сокращения избыточности голографической информации при передаче ее по каналам

связи с заданным качеством восстановленных изображений. При этом в каналах связи присутствуют аддитивные помехи, пространственный спектр которых заранее неизвестен. Получены соотношения для согласования параметров каналов связи с объемом передаваемой голографической информации при распределении элементов голограммы в соответствии с реализацией равновероятного закона. Исследована с помощью цифрового моделирования возможность сокращения избыточности при регистрации голограмм на неэквидистантных (квазипериодических) решетках.

Распределение элементов на излучающей и приемной антеннах соответствует двум независимым реализациям равновероятного закона. При этом в результате синтеза формируется неэквидистантная решетка. Этот метод позволяет сократить избыточность голографической информации

$$J = N_r \log_2 (m+1), \quad (1)$$

(где N_r – число элементов голограммы; m – число градаций амплитуды поля, зарегистрированного на голограмме) и обеспечивает возможность согласования объема передаваемой информации с пропускной способностью стандартного телевизионного канала цветного телевидения

$$C = N'_r \log_2 (m'+1). \quad (2)$$

Здесь $N'_r = 2\Delta F/\nu_g$ – число передаваемых по каналу связи элементов; ΔF – ширина полосы частот канала связи; ν_g – частота передачи голографической информации; m' – число градаций передаваемых по каналу, максимальное число которых определяется отношением сигнал/шум в канале связи $I_{\text{ук}}/I_{\text{фк}}$.

Распределение элементов на излучающей и приемной антеннах в соответствии с двумя независимыми реализациями равновероятного закона позволяет сократить избыточность голографической информации, и обеспечивает возможность согласования объема передаваемой информации с пропускной способностью стандартного телевизионного канала цветного телевидения. Для получения качественного изображения объекта, восстановленного на приемном конце по переданной голограмме, с заданным отношением сигнал/шум ($I_u/I_{\text{ф}}$) необходимо, чтобы отношение числа элементов синтезированной голограммы MN превышало число разрешаемых элементов, на объекте M_0N_0 в $I_u/I_{\text{ф}}$ раз:

$$MN/M_0N_0 = I_u/I_{\text{ф}} \quad (3)$$

Максимальные интервалы дискретизации синтезированной голограммы $\Delta\mu_{\text{max}}, \Delta\nu_{\text{max}}$ при этом не должны превышать минимальные пространственные частоты объектов μ_0, ν_0 :

$$\Delta\mu_{\text{max}} \leq \mu_0, \quad \Delta\nu_{\text{max}} \leq \nu_0 \quad (4)$$

а средние значения интервалов дискретизации голограммы $\Delta\mu_{\text{cp}}, \Delta\nu_{\text{cp}}$ должны удовлетворять неравенству:

$$\Delta\mu_{\text{cp}}\Delta\nu_{\text{cp}} \leq \mu_0\nu_0/(I_u/I_{\text{ф}}) \quad (5)$$

Выполнение этих условий обеспечивает выделения изображения объекта из шумов, имеющих другие пространственные спектры.

При формировании голограмм на неэквидистантной решетке и передаче ее по каналу связи с малым отношением сигнал/шум $I_{\text{ук}}/I_{\text{фк}} < 1$ и требуемым отношением сигнал/шум в изображении $I_u/I_{\text{ф}}$ необходимо, чтобы число передаваемых элементов голограммы MN превышало количество разрешающих элементов на объекте M_0N_0 в $(I_u/I_{\text{ф}})/(I_{\text{ук}}/I_{\text{фк}})$ раз:

$$MN/M_0N_0 = (I_u/I_{\text{ф}})/(I_{\text{ук}}/I_{\text{фк}}) \quad (6)$$

В связи с этим можно сделать вывод, что в ГТС целесообразно производить регистрацию голограмм на неэквидистантных решетках, синтезированных с помощью скрещенных антенн, элементы которых имеют координаты, соответствующие двум независимым реализациям равновероятного распределения, параметры которых согласованы с пространственными спектрами объектов регистрируемой сцены.

ДЕЙСТВУЮЩИЙ МАКЕТ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕЛЕВИЗИОННОЙ СИСТЕМЫ

Действующий макет ГТС был разработан и создан с применением рассмотренного выше принципа синтеза апертуры с помощью двух скрещенных линейных оптических антенн и принципа оптического гетеродирования [8-10]. На рис. 1 приведена структурная схема ГТС.

Макет ГТС работает следующим образом. Излучение лазера 1 предметного канала 2 подают на акустооптический дефлектор 3 и с помощью блока управления 4 генератора ультравысоких частот 5, последовательно отклоняют лазерный луч и освещают входные торцы световодов из набора $b_1...b_N$. При этом каждый активный световод набора $b_1...b_N$ на определенном участке сворачивают в спираль и с помощью блока накачка 8 и цилиндрических отражателей $7_1...7_N$ активируют световым излучением, обеспечивающим усиление лазерного излучения в этих участках световодов. Зондирующие сигналы, излученные из исходных торцов световодов набора $b_1...b_N$, проходят через линейку микрообъективов $9_1...9_N$, которые обеспечивают требуемый угол расходимости освещения объекта голографирования (на рис. не показано). Совокупность расположенных на отрезке прямой микрообъективов $9_1...9_N$, излучающих последовательно зондирующие сигналы, обеспечивает формирование излучения со сканирующим фазовым центром волны.

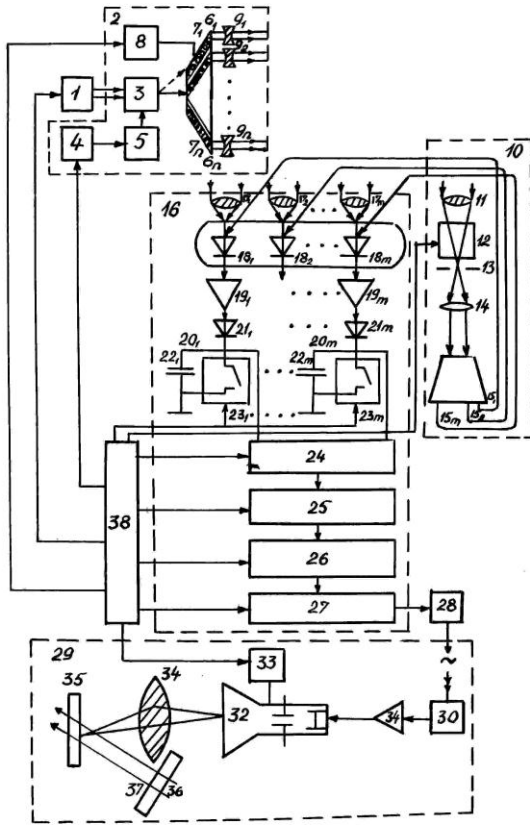


Рис.1. Структурная схема макета ГТС

фильтра 13 от высоких пространственных частот и с помощью окуляра 14 подают на вход набора световодов 15₁...15_М. Наличие в опорном канале 10 нелинейного активного элемента усилителя 12 позволяет производить сдвиг частоты излучения на некоторую постоянную величину $\delta\omega = \omega_0 - \omega_r$, где ω_0 – частота предметного излучения; ω_r – частота излучения в опорном канале. Поле сфокусированных опорных пучков, которые подаются на линейку фотоприемников 18₁...18_М, расположенных вдоль оси μ , можно представить в виде:

$$E_r(\mu, v, t) = (A_r/r_r^2) \exp\{i\omega_r t - (i2\pi/\lambda_r)[r_r + [(\mu - x_r)^2 + (v - y_r)^2]/2r_r] + \Phi_r\} \quad (8)$$

где A_r , ω_r , Φ_r – амплитуда, частота и фаза опорной волны.

Поле, рассеянное объектом голографирования и принятое линейкой фотодетекторов 18₁...18_М, при излучении, синтезируемом вдоль оси v набора световодов 6₁...6_М, можно представить в следующем виде:

$$E_0(\mu, v, t) = (A_0/r_0^2) \exp\{i\omega_0 t - (i2\pi/\lambda_0)[2r_0 + [(\mu - x_0)^2 + (v - y_0)^2]/2r_0 + (x_0^2 + y_0^2)/2r_0] + \Phi_0\} \quad (9)$$

где A_0 , ω_0 , Φ_0 – амплитуда, частота и фаза предметной волны; $r_r \approx r_0$ – расстояние от устройства до объекта.

При скорости считывания голографической информации вдоль оси μ , равной u , и скорости переключения излучаемых элементов вдоль оси v , равной v , интенсивность синтезированной голограммы точки объекта с координатами x_0 , y_0 задается выражением:

$$I(\mu, v, t) = |E_0(\mu, v, t) + E_r(\mu, v, t)|^2 = |E_0(\mu, v, t)|^2 + |E_r(\mu, v, t)|^2 + 2(A_0 A_r r_0^2 r_r^2) \cos\{(\omega_0 - \omega_r)t + (2\pi/\lambda_0)[2r_0 + [(u - x_0)^2 + (v - y_0)^2]/2r_0 + (x_0^2 + y_0^2)/2r_0] - (2\pi/\lambda_r)[r_r + [(u - x_r)^2 + (v - y_r)^2]/2r_r] - \Phi_r + \Phi_0\}. \quad (10)$$

При сканировании предметным лучом переменный ток, возникающий в цепи фотоприемников, пропорциональный только последнему члену уравнения голограммы (10), так как два первых члена, отвечающих прямому пучку в восстановленном изображении, не изменяются во времени, а поэтому и не передаются. Единственный сигнал, который изменяется во времени, обусловлен взаимодействием узкого опорного пучка с предметным пучком при его сканировании по осям μ и v .

Так как в течение длительности зондирующего импульса входные торцы набора световодов 6₁...6_М облучают поочередно, то из выходных торцов световодов последовательно излучают зондирующие сигналы продолжительностью:

$$t_3 = t_{\text{имп}}/N, \quad (7)$$

где t_3 – продолжительность зондирующего сигнала, излучаемого каждым световодом; $t_{\text{имп}}$ – продолжительность зондирующего импульса; N – число световодов в наборе 6₁...6_М.

Рассеянное на объекте голографирования излучение подают одновременно на линейку микрообъективов 17₁...17_М блока формирования голограмм 16. Линейку микрообъективов 17₁...17_М располагают перпендикулярно к линейке рассеивающих линз 9₁...9_М и падающее на микрообъективы 17₁...17_М излучение фокусируют на фотоприемниках 18₁...18_М. Одновременно на линейку фотоприемников 18₁...18_М подают через световоды из второго набора 15₁...15_М опорное излучение. Опорный канал 10 формируют путем деления рассеянного объектом излучения по фронту волны с помощью телескопической системы, которая состоит из объектива 11 и окуляра 14. Рассеянное на объекте голографирования излучение подают на объектив 11 опорного канала 10, усиливают энергетически квантовым усилителем 12, который кроме усиления энергетически слабых колебаний, рассеянных объектом, позволяет изменением коэффициента его усиления регулировать соотношение интенсивности опорного и предметного пучков. Затем принятое излучение фильтруют диафрагмой пространственного

При движении сканирующего предметного пучка вдоль оси μ со скоростью u и вдоль оси v со скоростью v ток на выходе детектора пропорционален интенсивности соответствующей точки (μ, v) голограммы при сканировании ее от геометрического центра $(\mu=ut, v=vt)$ интерференционной структуры, образованной рассеянной предметной волной и осевой сфокусированной опорной волной. Если угловое отклонение предметного пучка достаточно мало, то есть расстояния от точки (x_0, y_0) объекта до каждой точки на осях μ и v значительно превосходят размеры объекта и голограммы и $2\pi/\lambda_0=k$, тогда выполняется соотношение:

$$I(t) \approx (\eta e/z_0 h\nu) 2(A_0 A_r/r_0^2 r_r^2) \cos\{(\omega_0 - \omega_r)t + (2\pi/2\lambda_0)[2r_0 + [(ut-x_0)^2 + (vt-y_0)^2]/2r_0 + (x_0^2 + y_0^2)/2r_0] - (2\pi/\lambda_r)[r_r + [(ut-x_r)^2 + (vt-y_r)^2]/2r_r] - \Phi_r + \Phi_0\}, \quad (11)$$

где η – квантовый выход детектора; e – электронный заряд; $h\nu$ – энергия фотона; z_0 – импеданс открытого пространства.

Из этого выражения следует, что при синтезировании голограммы на разностной частоте $\delta\omega=\omega_0-\omega_r$, намного большей пространственной частоты голограммы, ее спектр сдвигается на величину $\delta\omega$. Это позволяет улучшить разрешающую способность голограммы вдоль каждой оси по сравнению с голограммой, которая регистрируется при $\delta\omega=0$, что позволяет улучшать пространственное разрешение Габоровских составляющих в восстановленном изображении, избегая при этом перекрытия восстановленных изображений.

Таким образом, в результате сканирования фазовых центров излучения зондирующих сигналов в предметном канале на каждом фотоприемнике $18_1...18_M$ формирует строку голограммы, а совокупность электрических сигналов из выхода всех фотоприемников $18_1...18_M$ образует голограмму.

Электрические сигналы из выходов фотоприемников $18_1...18_M$ подают через линейку усилителей промежуточной частоты $19_1...19_M$ к линейке пиковых детекторов $20_1...20_M$, выполненных на диодах $21_1...21_M$ и конденсаторах $22_1...22_M$. К выходу пиковых детекторов $20_1...20_M$ подключают электронные $23_1...23_M$ и аналоговые $24_1...24_M$ ключи. Электрические сигналы с помощью конденсаторов $22_1...22_M$ накапливают и запоминают, затем через аналоговые ключи $24_1...24_M$ последовательно подключают на вход быстродействующего АЦП 25, преобразуют их в цифровой код, а затем записывают в динамическую память 26. При считывании информации электрический сигнал выводят через ЦАП 27 и подают на передающее устройство 28. С помощью радиоприемного устройства 30 принимают переданные сигналы и подают на вход усилителя 31 блока воспроизведения голограмм 29. В результате этих операций при одновременной развертке электронного луча, производимой с помощью генератора развертки 33, на экране ЭЛТ 32 формируют одну строку голограммы. По окончании этого процесса конденсаторы $22_1...22_M$ разряжают через электронные ключи сброса заряда $23_1...23_M$, и система приходит в готовность для формирования следующей строки голограммы. Согласованную работу всех узлов системы обеспечивает синхронизатор 38, выходы которого электрически соединены со входами лазера 1, блока управления 4, генератора УВЧ 5, импульсного блока накачки 8, квантового усилителя 12, электронных $23_1...23_M$ и аналоговых $24_1...24_M$ ключей, АЦП 25, динамической памяти 26, ЦАП 27 и генератора развертки 33, ЭЛТ 32. Электрические сигналы, пропорциональные интерференционному рельефу голограммы, разворачивают на экране ЭЛТ 32 с помощью разверток по строке и по кадру и затем с помощью объектива 34 проецируют на неподвижный фотохромный материал 35 и производят его экспонирование. Под действием излучения люминофора фотохромный материал окрашивается и образует изображение голограммы. По полученной голограмме изображение восстанавливают с помощью лазера 36 и корректирующего голографического фильтра 37, с помощью которого компенсируют фазовые набег в наборе световодов $6_1...6_N$ и $15_1...15_M$.

Предлагаемый макет ГТС обеспечивает существенное повышение качества изображений, так как опорные сигналы выделяются из части излучения, рассеянного объектом, и контраст интерференционной структуры формируемой голограммы не зависит от расстояния до сцены голографирования и от перемещения объектов в объеме этой сцены, а использование в опорном канале квантового усилителя дает возможность, с одной стороны, управлять соотношением интенсивности опорного и предметного пучков для создания высокого контраста интерференционной структуры голограммы, а, с другой стороны, путем нелинейного сдвига частоты опорного излучения позволяет сузить спектр пространственных частот голограммы до диапазона пространственных частот объекта голографирования, избегая при этом перекрытия восстановленных изображений. Кроме того, используя в качестве квантовых усилителей участки световодов в блоке подсветки предметного канала, можно добиться равномерного освещения сцены голографирования. Повышение качества голографических ТВ-изображений достигается также за счет применения электронной схемы, выполненной на современной элементной базе в интегральном исполнении, что обеспечивает повышение скорости регистрации информации о перемещающихся объектах и ее обработку и передачу в реальном времени.

Расположение приемных элементов голографического телевизионного устройства в соответствии с законом распределения фоторецепторов на сетчатке глаза [11] позволяет существенно сократить объем избыточной информации в ТВ голограммах и обеспечивает возможность согласования объема передаваемой голографической информации с пропускной способностью стандартного телевизионного канала [12, 13].

Большая разница в интенсивности низких и высоких пространственных частот создает трудности при их одновременной регистрации на линейном участке характеристической кривой регистрирующей среды. Эту проблему можно решить, применив, по аналогии со зрительной системой [11] устройства регистрации с логарифмической характеристикой, выходящей на насыщение при превышении некоторой пороговой величины.

Яркостная структура ТВ голограмм такова, что низкие пространственные частоты содержат 95% энергии спектра, а на высокочастотные составляющие, определяющие общую четкость изображения, приходится лишь 5% энергии. Использование при регистрации ТВ голограмм фильтра пространственных частот с характеристикой, аналогичной частотной передаточной функции зрительной системы, позволяет сохранить необходимые низкочастотные составляющие и достаточное количество высокочастотных. При этом сокращение объема избыточной информации не влияет существенным образом на резкость воспринимаемых глазом восстановленных изображений. Сочетание логарифмических фотодетекторов и полосовой пространственной фильтрации с характеристикой фильтра, аналогичной передаточной функции зрительной системы человека, позволяет улучшить качество голографических изображений и подавлять сопутствующие шумы.

СИНТЕЗИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ МНОГОЧАСТОТНЫХ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ ГОЛОГРАММ

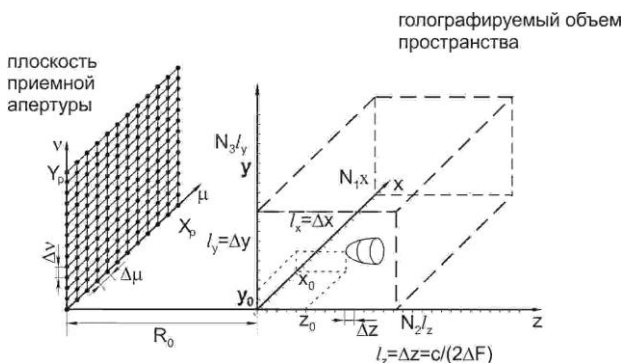
Вопросы записи оптических голограмм в трехмерных фотосредах достаточно хорошо изучены [14, 15]. При формировании голограмм трехмерных объектов с помощью приемных фотоэлектрических матриц возникают проблемы регистрации трехмерных интерференционных структур и восстановления по ним изображений.

В радиоголографии известны методы синтеза многократных голограмм с трехмерным объемом голографируемого пространства [4], которые находят практическое применение [16]. Рассмотрим возможности использования известных радиоголографических методов синтеза многократных голограмм трехмерных объектов в оптическом диапазоне. Регистрация таких голограмм может быть произведена как на двумерных фотоэлектрических матрицах, так и с помощью скрещенных линейных оптических антенн.

Изображения, восстановленные по многократным радиоголограммам, рассматриваются либо в плане [4], либо по отдельности для каждой частоты облучения объекта в картинной плоскости [16]. В [17] предлагается рассматривать зафиксированную радиоголограмму для каждого центра рассеяния как трехмерную дифракционную решетку, а отражательную способность и относительное положение каждого центра определять, выполняя трехмерное преобразование Фурье этих данных. Предлагается распространить это представление на синтезированные оптические многократные голограммы и рассматривать их как трехмерные голографические структуры, содержащие информацию о функции рассеяния и форме поверхности всего объемного объекта в целом. Восстановление изображений по таким трехмерным голограммам осуществляется на компьютере с помощью трехмерных дискретных преобразований и приводит к формированию трехмерных информационных массивов, элементы которых соответствуют элементам объемных изображений [18].

Если объемный объект облучают плоской волной, частота которой имеет линейную модуляцию (ЛЧМ), то в плоскости (μ, ν) расположенной на расстоянии R_0 от плоскости (x, y) , находящейся вблизи объекта (рис. 2), отраженный сигнал в момент времени t в зоне дифракции Френеля можно записать в виде:

$$E(\mu, \nu, t) = E_c \iint_{-\infty}^{\infty} S(x, y) \exp \left\{ -i \frac{2\pi}{c} \left(f_H + \frac{t\Delta F}{T} \right) \frac{2\Psi(x, y) + 2R_0 + [(\mu - x)^2 + (\nu - y)^2]}{2R_0} - \tau_s c \right\} dx dy, \quad (12)$$



двумерная голограмма. За время перестройки частоты $T = N_2 \Delta t$ можно зарегистрировать N_2 двумерных голограмм через интервалы времени Δt . Каждая такая двумерная голограмма представляет собой двумерное сечение трехмерной многочастотной голограммы, которую можно синтезировать на указанных частотах f_n (при $n = 0, \dots, N_2 - 1$). Как известно [4], разрешающая способность такой голограммы l_x, l_y в картинной плоскости (x, y) зависит от размеров апертуры голограммы X_F, Y_F :

$$l_x = \Delta x = \lambda_H R_0 / X_F; l_y = \Delta y = \lambda_H R_0 / Y_F, \quad (13)$$

а в продольном направлении, совпадающем с направлением распространения ЛЧМ-сигнала, и перпендикулярном плоскости (x, y) , – от ширины и полосы перестройки частоты ΔF :

$$l_z = \Delta z = c / 2\Delta F \quad (14)$$

Здесь λ_H – длина волны; c – скорость света.

В дискретном виде элементы синтезированной трехмерной многочастотной голограммы можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} \Gamma(m\Delta\mu, k\Delta\nu, n\Delta f) = & E_c \sum_{p=0}^{N_1-1} \sum_{q=0}^{N_3-1} S(p\Delta x, q\Delta y) \times \\ & \times \exp \left\{ -i(2\pi/c) \cdot \left(f_H + n\Delta f \left[2R_0 + 2\Psi(p\Delta x, q\Delta y) + \left[(m\Delta\mu - p\Delta x)^2 + (k\Delta\nu - q\Delta y)^2 \right] / 2R_0 \right] - \tau_3 c \right) \right\} \\ & (m = 0, \dots, N_1-1; n = 0, \dots, N_2-1; k = 0, \dots, N_3-1) \end{aligned} \quad (15)$$

где $\Delta f = \Delta F / N_2 = \Delta t \Delta F / T$ – величина элемента дискретизации дискретно перестраиваемого ЛЧМ-сигнала.

Таким образом, синтезированная трехмерная голограмма состоит из $N_1 \times N_2 \times N_3$ элементов, причем приемная апертура имеет $N_1 \times N_3$ элементов, а число дискретных регистрируемых частот равно N_2 . Линейные размеры приемной апертуры голограммы, следовательно, равны:

$$X_F = \Delta\mu N_1, Y_F = \Delta\nu N_3 \quad (16)$$

Выбрав время задержки принимаемого сигнала [4] равным:

$$\tau_3 = 2(R_0 + \Delta l) / c \quad (17)$$

нулевую плоскость голографируемого пространства можно сместить на расстояние Δl от объекта. Если выбрать величину задержки равной $2R_0/c$ (при $\Delta l = 0$), то нулевая плоскость голографируемого пространства $(x|y)$ будет находиться на расстоянии R_0 от плоскости приемной апертуры $(\mu|v)$, как показано на рис. 2.

Если величина перестройки частоты ΔF много меньше значения f_H , то выражение (15) для синтезированной голограммы можно приближенно записать в виде [4]:

$$\begin{aligned} \Gamma(m\Delta\mu, k\Delta\nu, n\Delta f) = & E_c \sum_{p=0}^{N_1-1} \sum_{q=0}^{N_3-1} S(p\Delta x, q\Delta y) \times \\ & \times \exp \left\{ -i(2\pi/c) \left[2(f_H + n\Delta f) \cdot (-\Delta l + \Psi(p_1\Delta x, q_1\Delta y)) + f_H \left(((m\Delta\mu) - q_1\Delta x)^2 + (k\Delta\nu - q_1\Delta y)^2 \right) / 2R_0 \right] \right\} \\ & (m = 0, \dots, N_1-1; n = 0, \dots, N_2-1; k = 0, \dots, N_3-1) \end{aligned} \quad (18)$$

С помощью компьютера по такой трехмерной голограмме можно восстановить изображение трехмерного объекта, применяя обратное двумерное преобразование Френеля в плоскости (m, k) и обратное БПФ вдоль оси n :

$$\begin{aligned} J(p\Delta x, q\Delta y, y\Delta z) = & \sum_{m=0}^{N_1-1} \sum_{n=0}^{N_2-1} \sum_{k=0}^{N_3-1} \Gamma(m\Delta\mu, k\Delta\nu, n\Delta f) \times \\ & \times \exp \left\{ i(2\pi/c) f_H \left[(m\Delta\mu - p\Delta x)^2 + (k\Delta\nu - q\Delta y)^2 \right] / 2R_0 \right\} \exp \left[-i(2\pi/N_2) \nu n \right] \\ & (p = 0, \dots, N_1-1; \nu = 0, \dots, N_2-1; q = 0, \dots, N_3-1) \end{aligned} \quad (19)$$

В результате преобразования (19) будет получена трехмерная матрица с размерами $N_1 \times N_2 \times N_3$, значения элементов которой соответствуют значениям функции отражения объекта в дискретных точках, соответствующих координатам отражающих элементов объекта. Это изображение трехмерного объекта можно вывести в виде его сечений в картинной плоскости при тех значениях $z_v = \nu \Delta z$, при которых $S \neq 0$. Кроме того, поскольку в памяти компьютера содержится информация о трехмерном расположении элементов восстановленного изображения объекта, можно также получить его изображение в плане, в любой заданной плоскости, либо реконструировать его трехмерную форму на дисплее или принтере.

МАКЕТ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕЛЕВИЗИОННОЙ СИСТЕМЫ

Рассмотрим принципы построения и технические требования для лабораторного макета голографической системы, синтезирующей описанные выше трехмерные многочастотные голограммы (рис. 3). Он включает в

себя: многочастотный перестраиваемый лазер 1, расширитель пучка 2, трёхмерный объект 3, объектный 4 и опорный 5 каналы, включающие, соответственно, объектив 6, полупрозрачное зеркало 7, отражатели 8 и 8', короткофокусный объектив 9 и пространственный фильтр 10 для опорного пучка, ПЗС-камеру 11, устройство связи с объектом 12 и компьютер 13, с помощью которого производится синтезирование голограммы.

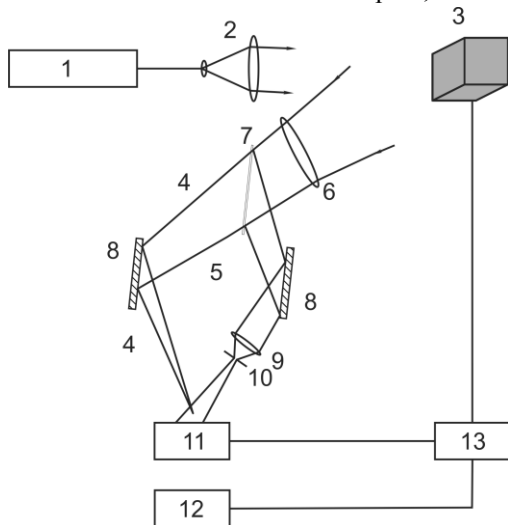


Рис.3. Структурная схема голографической системы, синтезирующей трехмерные многочастотные голограммы

Пусть расстояние от объекта до приемника излучения (ПЗС-камеры) $r=10$ м, длина волны $\lambda_H = 10^{-6}$ м, а размер голографируемой сцены должен составлять

$$X_0 \times Y_0 \times Z_0 = l_M \times l_M \times l_M \quad (20)$$

Требование к длине когерентности лазерного излучения ослабляется применением локального опорного пучка.

Пусть требуется получить изображение, в соответствии со стандартом ТВЧ, с числом строк $N_y = 1000$ и числом элементов разложения в строке $N_x = 2000$. Количество планов восстановленного изображения выберем равным $N_z = 100$. Тогда общее число элементов голограммы и массива восстановленного изображения (не обязательно полностью заполненного информативными элементами) равно:

$$N = N_x \times N_y \times N_z = 2 \times 10^8. \quad (21)$$

Разрешающая способность восстановленного изображения равна, соответственно, по осям x , y , z :

$$l_x = \frac{X_0}{N_x} = 10^{-3} \text{ M}; l_y = \frac{Y_0}{N_e} = 0,5 \times 10^{-3} \text{ M}; l_z = \frac{Z_0}{N_z} = 10^{-2} \text{ M} \quad (22)$$

Для обеспечения заданных размеров голографируемой сцены (20) и разрешающей способности (22) параметры системы синтеза голограммы в ГТС должны быть следующими:

- размеры приемных элементов ПЗС-камеры по осям x и y :

$$\Delta\mu=\lambda_H\frac{r}{X_0}=10^{-3}cM; \Delta\nu=\lambda_H\frac{r}{Y_0}=10^{-3}M, \quad (23)$$

что реально достижимо для современных ПЗС-камер, достигающих линейной плотности расположения элементов порядка 1000 элементов на 1 см ;

- величина разности соседних дискретных частот в многочастотном зондирующем излучении;

$$\Delta f = c/2Z_0 = 150 \quad (24)$$

- ширина полосы частот

$$\Delta F = \Delta f \times N_s = 1,5 \times 10^4 \quad (25)$$

что соответствует выполнению условия (17):

$$\Delta F \ll f_H = 3 \times 10^8 \quad (26)$$

- размеры приемной ПЗС-матрицы

$$X_r \times Y_r = \Delta\mu \times N_r \times \Delta v \times N_v = 1 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}, \quad (27)$$

что находится в пределах реально существующих размеров таких матриц.

При этом нужно отметить, что размер объектива ПЗС-матрицы должен быть сопоставим с размерами матрицы, как и величина хрусталика близка к величине желтого пятна человеческого глаза.

Оценим быстродействие регистрирующей системы ГТС. Один трехмерный многочастотный голографический кадр нужно сформировать за время:

$$t_K = 1/f_K = 0,04 \text{ c}, \quad (28)$$

где f_k – частота повторения кадров в ГТС, равная 25 кадров в сек. За это время лазер должен излучить 100 импульсов на 100 когерентных частотах. Временной интервал между одночастотными импульсами в пакете должен составлять:

$$\Delta t_{\text{umr}} = t_k / N_z = 0,4 \text{ мс}, \quad (29)$$

а время излучения каждого импульса, исходя из общих требований к ГТС, не должно превышать

$$t_{\text{sum}} \leq 10 \text{ нс.} \quad (30)$$

В течение временного интервала $t_{имп.}$ ПЗС-камера должна зарегистрировать один одночастотный кадр, а период $\Delta t_{имп.}$ должен соответствовать времени релаксации приемных элементов ПЗС-матрицы, то есть элементы должны быть готовы к регистрации нового одночастотного импульса через каждые 0,4 мс. Скорость считывания трехмерного кадра, то есть поэлементного ввода информации с ПЗС-камеры в оперативную память компьютера, должна составлять:

$$v_{\text{сум.}} = N/t_k = 0,5 \times 10^{10} \text{ элем./с.} \quad (31)$$

При этом время записи одного элемента голограммы в память компьютера не должна превышать:

$$t_{эл.} = 2 \times 10^{-10} \text{ с} = 0,2 \text{ нс}. \quad (32)$$

Следовательно, мощность излучения каждого одночастотного импульса должна быть такой, чтобы за время $t_{эл.}$ приемный элемент ПЗС-матрицы успел зарегистрировать необходимую часть энергии рассеянного объектом излучения.

Таким образом, наиболее жесткие требования предъявляются к скорости считывания информации с ПЗС-камеры и ее ввода в компьютер: требуется быстроедействие 5 млрд. операций в секунду, что достижимо для современных мощных компьютеров.

Для передачи по каналу связи такого количества информации с числом градаций $m=256$ потребуется пропускная способность канала за один кадр C_k :

$$C_k = N \log_2(m=1) = 16 \times 10^8 \text{ бит/кадр}, \quad (33)$$

что на два порядка превышает пропускную способность стандартных ТВ-каналов ($4,2 \times 10^6$ бит/кадр), но находится в пределах технических возможностей для современных волоконно-оптических линий связи (ВОЛС). При этом потребуется ширина полосы частот:

$$\Delta F_k = N f_k / 2 = 2500 \text{ МГц}, \quad (34)$$

что лишь на три порядка больше стандартной полосы частот ТВ-каналов ($\Delta F_{ТВ} = 6,5 \text{ МГц}$) и на два порядка – ширины полосы частот ТВЧ ($\Delta F_{ТВЧ} = 30 \text{ МГц}$). Требуемая ширина полосы частот (34) также может быть реализована с помощью современных ВОЛС.

Необходимо отметить, что в зависимости от параметров объектива ПЗС-камеры данная система может синтезировать как голограмму Френеля, так и голограмму Фурье, при этом фурье-преобразование реализуется с помощью линзы объектива и дополнительных корректирующих элементов, а настройка системы на фурье-преобразование производится с помощью голографических тест-таблиц, описанных в [19].

Если в ГТС реализовать систему синтеза трехмерных многочастотных голограмм с помощью скрещенных линейных оптических антенн, одна из которых – передающая, а другая – приемная, то требования к быстроедействию оптических устройств ужесточаются, хотя и не выйдут за пределы имеющихся в настоящее время технических возможностей, поскольку оптика фемтосекундных лазерных импульсов [20] с длительностью излучения импульса $t_{имп.} \approx 10^{-15} \text{ с}$ не только существует, но и успешно применяется в голографии [21].

При синтезировании голограмм с помощью скрещенных линейных оптических антенн сигналы, излученные передающей линейкой, последовательно принимаются элементами приемной антенны. При этом может быть два варианта: либо поочередно формируются одночастотные кадры для каждой из 100 дискретных частот, либо каждый элемент приемной антенны записывает сразу весь многочастотный пакет.

В первом случае одночастотный импульс делится на 2000 пучков с помощью дефлектора (что соответствует числу элементов разложения в строке), а прием ведется с помощью ПЗС-линейки из 1000 элементов, каждый из которых формирует одну строку голограммы. Для одного трехмерного кадра голограммы нужно сформировать 100 одночастотных двумерных кадров. При этом лазер должен излучить 100 одночастотных импульсов на разных частотах за время формирования кадра $t_{имп.} \approx 0,04 \text{ с}$. Время излучения каждого импульса составит $t_{имп.} \approx 10 \text{ нс}$ с временными интервалами между импульсами $\Delta t_{имп.} \approx 0,4 \text{ мс}$. Дефлектор должен разделить этот импульс на 2000 пучков, но, применяя схему с локальным опорным пучком, можно считать, что требование $t_{имп.} \approx 10 \text{ нс}$ предъявляется к каждому из 2000 пучков, тогда суммарное значение времени регистрации всех 2000 пучков равно:

$$\sum_{i=1}^{2000} t_{имп.} \approx 2 \times 10^{-5} \text{ с}, \quad (35)$$

что соответствует интервалу времени, за который лазер должен излучить каждый одночастотный импульс.

Однако требуемая скорость считывания информации с каждого элемента линейки резко уменьшится – в 2000 раз, так как элементов в 2000 раз меньше по сравнению с ПЗС-матрицей.

ЦВЕТНАЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ТЕЛЕВИЗИОННАЯ СИСТЕМА

Построение цветной голографической телевизионной системы (ЦГТС) представляет собой отдельную задачу, поскольку регистрация многоцветной голограммы и восстановление по ней многоцветного изображения имеет свою специфику и требует использования схем голографирования и восстановления изображения, существенно отличающихся от одноцветного случая.

В [22] обсуждаются некоторые методы цифрового синтеза голограмм, позволяющие осуществить восстановление изображения в цвете. Как и в цветной фотографии, синтезированные голограммы с восстановлением изображения в цвете получаются путем комбинирования трех или более одноцветных изображений. Эти изображения называют цветоделенными, и они чаще всего соответствуют трем первичным (аддитивным) цветам: красному, синему, зеленому. Поскольку используется несколько изображений, синтезированные голограммы, по которым восстанавливаются эти изображения, должны быть в той или иной форме мультиплексными.

Имеются три варианта мультиплицирования для формирования синтезированных голограмм с восстановлением в цвете: пространственное разделение, разделение с несущей частотой и мультиплицирование посредством тета-модуляции [22].

Мультиплицирование методом пространственного разделения означает, что цветоделенные изображения восстанавливаются различными голограммами. Эти голограммы могут располагаться рядом в одной плоскости или в различных местах и объединяться средствами оптики. Они могут даже перекрываться. Каждая голограмма освещается светом соответствующего цвета так, чтобы восстановленные изображения накладывались друг на друга и были правильно масштабированы. Масштабирование необходимо потому, что размеры и положение изображений, восстанавливаемых по голограмме, изменяются в зависимости от длины волны¹. Преимущество пространственного разделения состоит в том, что цветоделенные голограммы для удобства восстановления можно масштабировать по отдельности.

Основная способность голограмм – хранить изображения с разными несущими частотами. Это значит, что цветоделенные изображения восстанавливаются в различных участках плоскости. В синтезированной голограмме можно разделить восстановленное изображение в первом порядке дифракции на три вертикальные или горизонтальные полосы. Для освещения голограммы используются три точечных источника: красный, зеленый, синий. Это можно выразить с помощью обозначения u_{mn}^{kz} , где первый верхний индекс обозначает цвет изображения, а второй – цвет источника освещения. Все изображения

$$\begin{aligned} &u_{mn}^{kk}, u_{mn}^{kz}, u_{mn}^{kc} \\ &u_{mn}^{zk}, u_{mn}^{zz}, u_{mn}^{zc} \\ &u_{mn}^{ck}, u_{mn}^{cz}, u_{mn}^{cc} \end{aligned}$$

восстанавливаются одновременно, но положение их зависит от расположения источника света. Эти источники можно расположить так, чтобы u_{mn}^{kk}, u_{mn}^{zz} и u_{mn}^{cc} накладывались друг на друга в некоторой области плоскости восстановления. Другие изображения будут располагаться вне области перекрытия. В результате получим цветное восстановленное изображение [23].

Цветоделенные изображения u_{mn}^{kk}, u_{mn}^{zz} и u_{mn}^{cc} должны иметь правильные относительные размеры. Поскольку на голограмме записаны все изображения, различие в масштабе нельзя скомпенсировать фотографическим уменьшением. Однако его можно учесть предварительным искажением объекта до того, как будет осуществлен синтез голограммы.

Третьим методом мультиплицирования является тета-модуляция [24]. В этом методе двухмерность оптических пространственных частот используется таким образом, что различные изображения записываются на пространственных частотах одного и того же модуля, но при различных угловых ориентациях. При этом восстановленные изображения располагаются на одном и том же расстоянии от оптической оси, но под разными углами относительно нее. Как и мультиплексные голограммы с несущей частотой, голограммы с тета-модуляцией восстанавливаются несколькими источниками света, причем перекрытие различных изображений достигается путем соответствующего расположения источников света.

Хорошим примером приемов, используемых при синтезе голограмм для восстановления в цвете, может служить мультиплицирование комбинированным методом пространственного разделения и тета-модуляции [25]. Изготавливаются две тета-модулированные голограммы, несущие по два изображения. Одна голограмма восстанавливает красное и зеленое цветоделенные изображения, а вторая – синее и зеленое. Два зеленых изображения используются потому, что в зеленом цвете разрешение зрения вдвое выше, чем в красном и синем. Эти два зеленых изображения получены с разными случайными фазовыми рассеивателями, что приводит к уменьшению влияния спеклов на качество изображения.

Освещая объемные голограммы белым светом, можно восстанавливать монохромные и цветные изображения [26]. Объемные синтезированные голограммы сочетают гибкость воспроизведения волнового фронта со способностью работать в белом свете. Так как структура объемной голограммы является трехмерной и очень сложной, непосредственный расчет и вычерчивание объемных голограмм не практикуются. Вместо этого применяют гибридные методы, комбинирующие синтезированную голограмму-маску и интерференционную запись. Известны два метода изготовления объемных синтезированных голограмм. Первый использует три осевые полутонные голограммы с вещественным значением пропускания для многократного экспонирования интерференционной голограммы. Во втором методе применяется одна внеосевая синтезированная голограмма как маска при экспозиции. Описание этих методов имеется в обзоре [22].

¹ Указанные свойства необходимо учитывать при цифровом моделировании, используя голограммы на трех длинах волн.

На основании анализа известных методов получения цветных изображений с помощью голограмм, а также разработанных методов синтеза трехмерных голограмм объемных объектов предлагаются принципы построения цветной ГТС, блок-схема которой представлена на рис. 4. Основными элементами ЦГТС

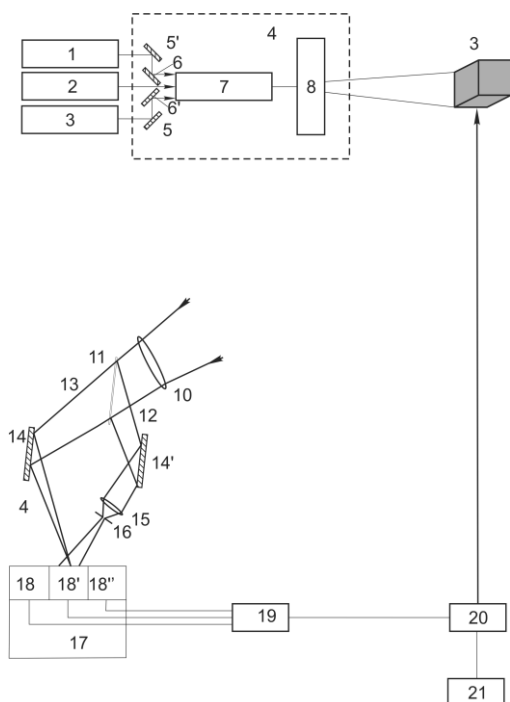


Рис. 4. Структурная схема цветной голографической системы

производится восстановление трехмерного цветного изображения объекта, которое воспроизводится на трехмерном дисплее 21.

ВЫВОДЫ

На основе методов радиоголографии и разработанной модели голографических механизмов зрительного восприятия предлагаются новые методы синтеза голограмм на фотоэлектрических устройствах и принципы построения голографических телевизионных систем. Разработана блок-схема голографической телевизионной системы. Показана возможность синтеза трёхмерных голограмм объёмных объектов на фотоэлектронных устройствах. Проведен анализ возможности создания цветного голографического телевидения. Предложенные методы и принципы построения цветных голографических систем являются весьма перспективными и, в отличие от стереоскопического телевидения, при их внедрении в производство будут дешевле и более качественными в эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копылов П.М. Телевидение и голография / П. М. Копылов, А. Н. Тачков. – М. : Связь, 1976. – 168 с.
2. Телевидение / под ред. П. В. Шмакова. – М. : Связь, 1979. – 432 с.
3. Передача и обработка информации голографическими методами / под ред. С. Б. Гуревича. – М. : Сов. радио, 1978. – 304 с.
4. Сафронов Г. С. Введение в радиоголографию / Г. С. Сафронов, А. П. Сафронова. – М. : Советское радио, 1973. – 288 с.
5. Богданова Т. В. Согласование объема голографической информации с параметрами каналов связи / Т. В. Богданова, Г. С. Сафронов, В. П. Титарь // Радиотехника и электроника. – 1990. – Т. 35, № 8. – С. 1720-1730.
6. Leith E., Upatnieks J., Hildebrand L., Haines K. Requirements for a wavefront reconstruction television system// Journal SMPTE. - 1965.-V.74.- P. 893-896.
7. Титарь В. П. Проблемы создания голографической телевизионной системы / В. П. Титарь, Т. В. Богданова // Радиотехника и электроника. – 1999. – № 2. – С. 38-42.
8. А. С. № 713305 СССР, МКИ³ G03H1/00, H04N15/00 Голографическое телевизионное устройство / Г. С. Сафронов, В. П. Титарь. – опубл. 30.03.79.,

9. Патент №18132298 Российской Федерации, МКИ³ G03H1/00, H04N15/00 Голографическое телевизионное устройство / Г. С. Сафронов, В. П. Титарь. – опубл. 20.07.94.,
10. Патент України 1481, МКИ³ G03H1/00, H04N15/00 Голографічний телевізійний пристрій / Сафронов Г. С., Титарь В.П.; опубл. 20.09.94.,
11. Титарь В. П. Голографическая модель физиологической оптики – новое направление для создания информационных систем / В. П. Титарь, О. В. Шпаченко // Радиотехника : всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2000. – Вып. 116. – С. 133 – 140.
12. Сафронов Г. С. Перспективы развития и применения голографического телевидения / Г. С. Сафронов, В. П. Титарь, Т. В. Богданова // XLIII Всесоюзн. науч.- сессия, посвященная Дню радио : тезисы докл. – М. : Радио и связь, 1988. – Ч. 2. – С. 82-83.
13. Богданова Т. В. Проблемы создания телевизионных голографических систем / Т. В. Богданова, Г. С. Сафронов, В. П. Титарь. // Всесоюзн конф «Развитие и совершенствование технических средств телевизионного вещания»– М. : Радио и связь, 1988. – С. 15-16.
14. Оптическая голография / под ред. Ю. Н. Денисюка. – Л. : Наука, 1979. – с.123
15. Оптическая голография с записью в трехмерных средах / под ред. Ю. Н. Денисюка.– Л.: Наука, 1986. – с.118
16. Беляиц А. Ч. Цифровое восстановление многочастотных изображений / А. Ч. Беляиц, П. Д. Кухарчик, В. П. Семенчик // Оптическая и цифровая обработка изображений. – Л. : Наука, 1988. – С. 101-104.
17. Пасмуров А. Я. Получение радиолокационных изображений летательных аппаратов / А. Я. Пасмуров // Зарубежная радиоэлектроника. – 1987. – № 12. – С. 3-30.
18. Богданова Т. В. Синтезирование многочастотных оптических голограмм трехмерных объектов / Т. В. Богданова, В. П. Титарь, Е. Я. Томчук // Применение методов и средств голографии. – М., 1997. – С. 226-233.
19. Сафронов Г. С. Тесты для контроля голографических систем / [Г. С. Сафронов, Т. В. Богданова, В. П. Титарь, Е. Я. Томчук, М. Т. Торкатюк] // V Всесоюзн. школа по оптической обработке информации : тезисы докл. – К., 1984. – С. 353-354.
20. Ахманов С.А. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов / С. А. Ахманов, В. А. Выслоух, А. С. Чиркин. – М. : Наука, 1988. – с. 296
21. Саари П. М. Запись пространственно-временных голограмм в спектрально-высокоселективных средах / П. М. Саари, А. К. Ребане, Р. К. Каарли // Оптическая голография с записью в трехмерных средах / под ред. Ю. Н. Денисюка. – Л. : Наука, Ленинград. отд., 1986. – С. 30-43.
22. Даллас У. Синтез голограмм на ЭВМ / У. Даллас // Компьютеры в оптических исследованиях / под ред. Б. Фридена. – М. : Мир, 1983. – 478 с.
23. Leith E., Upatnieks J. Wavefront reconstruction with Diffused Illumination and Three-dimensional Objects// J.Opt.Soc.Amer.1964.-V.54.-P.1895
24. Lohman A.W., Paris D.P. Binary Fraunhofer Holograms Generated by Computer//Appl.opt. -1967.-V.6.-P.1739.
25. Dallas W.J. Kinoform Fabrication-A New Method// Opt.Communi.-1973.-V.8.-P.340.
26. Kogelnik H. Coupled Wave Theory of Thick Hologram ratings//Bell Syst.Tech.J.-1969.-V.48.- 9.-P.2909-2947.